

PLACHY EMESE

Kaotikus dinamika vizsgálata  
változócsillagokban

Doktori értekezés tézisei

Témavezető:

Dr. Érdi Bálint

MTA doktora, egyetemi tanár

ELTE Csillagászati Tanszék

Konzulensek:

Dr. Kolláth Zoltán

MTA doktora, tudományos tanácsadó, egyetemi tanár

MTA CSFK, NYME SEK TTK

Dr. Szabó Róbert

tudományos főmunkatárs, MTA CSFK

Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar  
Fizika Doktori Iskola, Részecskefizika és csillagászat program  
A Doktori Iskola vezetője és programvezető: Dr. Palla László

2014



## 1. A kutatási téma háttere

A pulzáló változócsillagok kaotikus viselkedést mutathatnak, amelyet a radiális módusok nemlineáris csatolódása okoz. Az RR Lyrae csillagok esetében a káosz lehetőségével korábban nem számoltak, azonban a legújabb űrfotometriai megfigyelésben nemlineáris dinamikai folyamatokra utaló jeleket találtak. A *CoRoT*- és a *Kepler*-űrtávcsövek adataiból egyértelműen kimutatható a perióduskétszereződés jelensége. Ebből az állapotból a dinamikai rendszer, a paraméterek kis megváltozásával, további bifurkációkon keresztül kaotikus állapotba juthat. Ezt a lehetőséget RR Lyrae hidrodinamikai modellek is megerősítik. Az elmélet szerint a csillag alapl módusa és kilencedik felhangja közötti 9:2-es rezonancia instabilitása vezet a perióduskettőződéshez. Ugyanakkor az RR Lyrae csillagok esetén a káoszhoz egy harmadik rezgési módus, az első felhang jelenlétére is szükség van. Felmerült az is, hogy a 9:2-es rezonancia lehet felelős az RR Lyrae csillagok máig megmagyarázatlan amplitúdó- és fázismodulációs jelenségéért, a Blazskó-effektusért. Ha a magyarázat helyes, a Blazskó-modulációban észlelhető szabálytalanságnak kaotikus jellegűnek kell lennie. A káosz kimutatását az észlelési adatok minősége erősen limitálja, mivel a dinamikai vizsgálatokhoz folyamatos, hosszú és rendkívül pontos adatokra van szükség. Az RR Lyrae csillagok esetében megfelelő adatok gyűjtése csakis az űrből lehetséges.

Doktori kutatómunkám során a változócsillagok kaotikus jelenségeinek kimutathatóságával foglalkoztam. A dolgozatban három témában végzett vizsgálataimat írom le: a kaotikus dinamika kvantitatív tulajdonságait meghatározó eljárás tesztelését, RR Lyrae hidrodinamikai modellek dinamikai analízisét, és a Blazskó-moduláció kaotikusságának vizsgálatát egy *Kepler*-csillag esetében.

## 2. Vizsgálati módszerek és adatok

A dinamikai vizsgálatokat a globális fázistér-rekonstrukciós eljárással végeztem. A módszer alkalmazásával az alacsony dimenziójú káosz felismerhető, a rendszer bonyolultságát jelző fraktáldimenzió (Ljapunov-dimenzió) meghatározható. Az eljárás lényege, hogy egy paraméter idősorából kiindulva a dinamikát a fázistérben képes rekonstruálni. A rekonstrukció a szomszédos pontok kapcsolatát jelentő leképezés keresésén alapszik. A leképezés ismeretében az eredeti adathoz hasonlító és tetszőleges hosszúságú szintetikus adat hozható létre. A hosszú adatsorra a kaotikus trajektóriákra jellemző, exponenciális távolodás mértékének meghatározásához van szükség. Az eljárás során a leképezést kiterjedt paraméterterben érdemes keresni.

A tökéletes leképezés megtalálására azonban nem számíthatunk, a vizsgált rendszer Ljapunov-dimenziójának becslését a legjobb leképezésekből végezzük. Az eredeti és a szintetikus adatsorok összehasonlítása a Fourier-transzformált és a Broomhead–King-projekció segítségével történik.

Az eljárás teszteléséhez két csatolt Rössler-oszcillátor kaotikus adatsorát használtam. A Rössler-oszcillátorok korábbi tesztek során is jó szolgálatot tettek, ciklusaik alakja pedig a kaotikusan pulzáló csillagokéra nagyban hasonlít. A vizsgálathoz használt adatsort magam hoztam létre. Az észlelési adatokban gyakran előforduló, de nem a pulzációhoz tartozó hosszú időskálájú változások kiküszöböléséhez két módszert használtam, az EMD-algoritmust (Empirical Mode Decomposition) és a Fourier-szűrést. Előbbi egy szabálytalan idősorokra optimalizált, tapasztalati úton kifejlesztett módszer, amely az adatot szintén szabálytalan, úgynevezett belső módusfüggvényekre bontja. A módusfüggvények megfelelő kombinálásával szűrtem ki a hosszú időskálájú változást. A klasszikusnak számító Fourier-szűréssel viszont adott frekvenciatartományban lévő periodikus komponensek eltávolítását tudtam elvégezni.

A megvizsgált hidrodinamikai modellek a Florida–Budapest-kóddal újonnan létrehozott RR Lyrae modelleszaládból származnak. Az egydimenziós pulzációs kód a konvekciót tartalmazó csillagmodellek létrehozására képes.

Legújabb vizsgálatomban pedig a *Kepler*-űrtávcső által mért legrövidebb amplitúdómodulációs ciklussal rendelkező RR Lyrae csillag, a V783 Cyg egyedi aperitúrával készült fotometriai adataira támaszkodtam. A vizsgálatot a fénygörbéről leválasztott amplitúdó- és fázismodulációs görbéken végeztem el. A modulációs görbék előállítására többféle módszer kínálkozik. A pulzációs amplitúdó maximumait és a Fourier-paraméterek analitikus függvénnyel meghatározott változását használtam.

### 3. Saját tudományos eredmények

#### A globális fázistér-rekonstrukció tesztjei:

1. **A globális fázistér-rekonstrukció frekvencia és Ljapunov-dimenzió meghatározásának pontossága között nincs kapcsolat.**

A rekonstrukcióban létrejövő szintetikus adatsorok jellemző frekvenciái gyakran eltérnek az eredetiektől. Megvizsgáltam, hogy az eltérés és a rendszer Ljapunov-dimenziójának pontossága között felállítható-e összefüggés. A kapcsolat egy objektív kritériumot jelentene az eredeti és szintetikus adatsorok

összehasonlításában, amely az eljárást is meggyorsítaná. A vizsgálat eredménye arra utal, hogy a frekvenciák és a Ljapunov-dimenzió eltérése között nincs kapcsolat. [1]

**2. A hosszú időskálájú változások kiküszöbölése segíti a nemlineáris vizsgálatokat.**

Az észlelt fénygörbékben gyakran találkozunk olyan hosszú időskálájú változásokkal, amelyek nem a pulzációból erednek. Ezek zavaró hatással vannak a dinamikai vizsgálatokra. Két különböző módszert, a Fourier-szűrést és az EMD-metódust tesztelve megmutattam, hogy ezen változások eltávolítása az adatsorból megkönnyíti a kaotikus dinamika kimutatását. [2]

## **RR Lyrae modellek dinamikai vizsgálata:**

**3. A vizsgált kaotikus RR Lyrae modellek Ljapunov-dimenziója  $\sim 2,2$ , amelyet mind a sugárváltozásból, mind a luminozításváltozásból meg lehet határozni.**

A Florida–Budapest-kóddal létrehozott RR Lyrae model családból négy kaotikus modellnek végeztem el a globális-fázistér rekonstrukcióját. Mind a négy modell esetében  $\sim 2,2$  Ljapunov-dimenzió értéket detektáltam. A dinamikai vizsgálathoz a csillag globális paramétereit közül a sugárváltozás a legalkalmasabb. A csillagokból közvetlenül észlelhető luminozítást, komplex volta miatt nehéz rekonstruálni. Az RR Lyrae modellek luminozításának globális fázistér-rekonstrukciója során azonban sikerrel jártam. A Ljapunov-dimenzióra kapott eredmény azonos, de kevésbé robusztus, mint a sugárváltozás esetén. A vizsgálatot a luminozítás egyszerűbb alakra való transzformálása segítheti. [3]

**4. Az RR Lyr csillagban is észlelt 6:8-as rezonancia a hidrodinamikai modellek dinamikai környezetében megtalálható.**

A globális fázistér-rekonstrukció frekvenciaelhangolódási képessége lehetővé teszi, hogy az eredeti adatahoz dinamikailag hasonló szintetikus jeleket állítsunk elő, a rezonanciák felé közelítve. Ezért a rekonstrukciós eljárás az RR Lyrae modellezés kibővítéseként is használható. Vizsgálataimmal olyan rezonanciához közeli állapotot találtam (6:8-as rezonancia), amelyet a hidrodinamikai modellekben nem láttunk, azonban az észlelt adatokban jelen van. [3]

## A Blazskó-effektus dinamikai vizsgálata:

### 5. A Blazskó-moduláció irregularitásának feltételezett kaotikus természetű a V783 Cyg *Kepler*-adataiból nem erősíthető meg.

A Blazskó-effektus nemlineáris dinamikai analízisére első ízben tettem kísérletet. A vizsgálathoz, a legtöbb folyamatosan mért modulációs ciklusa miatt a V783 Cyg csillag tűnt a legjobb választásnak. A moduláció fénygörbéről való leválasztását adatredukciós problémák nehezítették. Megállapítottam, hogy a csillag modulációja ugyan illeszthető kaotikus jellel, de az instrumentális és adatfeldolgozási effektusok torzító hatása olyan erős, hogy az eredmény nem megbízható. [4]

## 4. Következtetések

A klasszikus változócsillagok dinamikai vizsgálata egy olyan jövőbeli kutatási téma, amelytől komoly eredményeket remélhetünk. A számítási kapacitás növekedésével egyre több és jobb hidrodinamikai modellt készíthetünk. Ezekből egyre inkább úgy tűnik, hogy a nemlineáris dinamika szerepet játszik a klasszikus radiális pulzátorokban. A megfelelő észlelési adatok birtokában a káosz magukból a csillagokból is kimutatható lesz. Vizsgálataim mind azt célozták, hogy kiderítsem, miként tudjuk a globális fázistér-rekonstrukciós eljárást ebben a témakörben alkalmazni, és mik a korlátai.

Megmutattam, hogy a módszernek mind az elméleti modellezésben, mind az észlelési adatok vizsgálatában nagy haszna van. Az eljárásban létrejövő szintetikus adatok frekvenciái és dinamikai tulajdonságai között nincs kapcsolat. Ezt egy olyan frekvenciaelhangelődhési képességnek tekinthetjük, amelynek segítségével megtalálhatjuk a rendszer dinamikai környezetében lévő rezonanciákat. Még olyan rezonanciákat is, amelyeket a hidrodinamikai modellek, korlátaik miatt, nem képesek létrehozni. A lehetséges rezonanciák ismerete a csillagok fényességadataiban való keresésüket nagyban megkönnyíti.

Az RR Lyrae csillagok fénygörbéinek alakja összetett, finomszerkezetű a lökeshullámok alakítják. A globális fázistér-rekonstrukció a finomszerkezetet nem képes visszaadni, de a fénygörbe karakterisztikáját igen. Az RR Lyrae modelleken végzett vizsgálataim megmutatták, hogy a kvalitatív tulajdonságokat nemcsak a sugárváltozásból, hanem a fénygörbéből is meghatározhatjuk. Tehát a fénygörbét bátran használhatjuk a kaotikus dinamika keresésére. A siker kulcsa az adatminőségben

rejlík. Lehet akármilyen pontos az űrtávcsöves megfigyelés, az adatszakadások, az instrumentális eredetű trendek és az eltérő érzékenységű CCD-kkel mért adatszakaszok összeillesztési problémái ellehetetleníthetik a dinamikai vizsgálatot. Megfelelően sűrű mintavételezés nélkül pedig szintén nem kaphatunk megbízható eredményt. A jelenleg rendelkezésre álló űrfotometriai adatok közül a *Kepler*-űrtávcső 1 perces mintavételezési módban mért fényességadatai alkalmasnak tűnnek a dinamikai vizsgálatokhoz. Az űrtávcső meghosszabbított, *K2*-missziójában a célpontokra adott javaslatainknál ezt már figyelembe vesszük: irreguláris viselkedést sejtető jelöltek rövid mintavételezését kérjük.

Irregularitást a modulált RR Lyrae csillagoknál látunk. A Blazskó-moduláció jelenléte vélhetőleg hatással lesz a rekonstrukcióra. Tesztjeimből kiderült, hogy a hosszú időskálájú változások nem feltétlenül lehetetlenítik el a vizsgálatot, de eltávolításuk segít. Ez a modulációra is érvényes lehet. A moduláció fénygörbéről való leválasztása azonban tapasztalataim szerint igen körülményes és megbízhatatlan, a vizsgálatokat valószínűleg a moduláció leválasztása nélkül lesz célszerű elvégezni. Magának a leválasztott modulációnak a dinamikai vizsgálata a V783 Cyg esetében nem adott egyértelmű eredményt. A *Kepler*-mezőben lévő két további jelölt vizsgálata lehetséges. Alkalmas adatokra számítunk a jövőbeli *TESS*- és *PLATO*-missziókból is.

## 5. A tézisek alapjául szolgáló referált publikációk

- [1] Plachy, E., Kolláth, Z.: *Testing the global flow reconstruction method on coupled chaotic oscillators*, 2010, JPhCS, 218, 012029
- [2] Plachy, E., Kolláth, Z.: *Elimination of long-term variations from chaotic light curves*, 2013, AN, 334, 984
- [3] Plachy, E., Kolláth, Z., Molnár, L.: *Low-dimensional chaos in RR Lyrae models*, 2013, MNRAS, 433, 3590
- [4] Plachy, E., Benkő, J. M., Kolláth, Z., Molnár, L., Szabó, R.: *Non-linear dynamical analysis of the Blazhko effect with the Kepler space telescope: the case of V783 Cyg*, 2014, MNRAS, 445, 2810